

RCB법에 의한 원통형 플린지 연삭공정의 사이클 시간 감소에 관한 연구

최성주*, K. Danai**

A Study on the Cycle Time Reduction of Cylindrical Plunge Grinding Process with Recursive Constraint Bounding Method

Seong Joo Choi*, K. Danai**

Abstract

This study presents the recursive constraint bounding(RCB) method to reduce the cycle time in internal cylindrical plunge grinding process. This method can cope with process noise as well as modeling bias. The main features of RCB method are its utilization of measurements at the end of each cycle and its use of monotonicity analysis for determining the extremes of bias and noise. This method is investigated in simulation and evaluated by experiment in internal cylindrical plunge grinding operation. The results from simulation and experiment show that it is effective in reducing cycle time in spite of modeling uncertainty in the forms of process noise and modeling bias.

Keywords : Cycle Time(사이클시간), Modeling Uncertainty(모델링 불확실성) Process Noise(공정잡음), Internal Cylindrical Plunge Grinding(내면원통 플린지 연삭)

1. 서 론

일반적으로 최적화 방법은 생산공정에서의 생산단가를 감소시키는데 적용된다. 이러한 응용에서는 제어변수

들의 향으로 표현되는 구속조건을 정의하는데 공정의 수학적 모델이 필요하다. 그러나 제조공정의 내재된 불확실성(uncertainty)은 공정을 정확하게 수학모델로 나타내는 것을 방해하고 있으며 비선형 프로그래밍 방법 등과 같은 전통적인 최적화방법의 적용을 어렵게 만든다.^[6] 제조공정에서의 불확실성의 발생원은 : (1) 재료 성질, 공구성질, 공정조건과 같은 제조조건의 다양성

* 한국기술교육대학교 생산기계공학과

** Dept. of Mechanical Eng. Uni. of Massachusetts

(2) 측정잡음과 재료의 불균일성에 기인한 잡음 등을 들 수 있다. 불확실성의 첫째 발생원은 최적화 이전에 특별한 제조조건을 위한 모델 파라미터를 조정함으로써 제거할 수 있다. 그러나 모델 파라미터를 조정하는데 관련되는 실험 비용은 최적화에 의하여 가능한 절감비용에 비하면 비용이 많이 든다. 다른 선택으로서 모델 파라미터들에 대하여 근사값이 사용된다. 이 근사방법은 모델링 바이어스(modeling bias)를 가져와서 불확실하게 모델된 구속변수들을 만들어 낸다. 이 모델링바이어스는 공정의 불규칙한 특성에 대처하기 위하여 설계된 통계적 최적화방법에 대한 어려움을 야기 시킨다.[2]

본 연구에서는 모델링 바이어스와 잡음에 대처하기 위하여 고안된 RCB법(Recursive Constraint Bounding)을 소개한다.^[4,15] RCB법은 다음의 세가지 정보를 이용한다. :

- (1) 제어변수와 구속변수의 관계로 구성되는 근사모델
- (2) 근사모델에서 불확정 계수와 지수값의 범위를 규정하는 불확실성 경계
- (3) 각 사이클 종료시 구속변수들의 측정값

위의 (1)과 (2)는 구속변수들이 그들의 한계값을 넘지 못하도록, 주어진 제어변수들의 집합으로부터 얻어지는 가장 큰 측정값을 RCB법이 결정하도록 해준다. 세 번째의 정보는 공정의 최적성을 평가하거나 또는 공정이 더욱 개선되도록 어떤 변수가 변경될 수 있는지를 결정하는데 이용된다. 이와같은 과정의 반복에 의하여 이 방법은 어떠한 공정 구속조건도 침해하지 않으면서 그 공정이 최적화에 도달하도록 해 준다.

이 방법은 내면 원통연삭에 대한 시뮬레이션으로 검증된다. 이를 위하여 구속변수들은 제어변수로서 시뮬레이션 된 값으로 결정되며, 불확실성은 바이어스의 범위안에 있는 불확정 파라미터의 값을 선택함으로써 통합된다. 또한 측정변수의 불규칙성은 잡음의 향으로 고려된다. 시뮬레이션을 통하여 얻어진 결과들은 RCB법이 모델링바이어스나 잡음의 존재에도 불구하고 내면 원통연삭을 최적화하는데 효과가 있음을 보여 주며, 내면 원통연삭에 대하여 실험적으로 평가된다.

2. RCB법

최적화문제는 일반적으로 다음과 같이 정의된다

$$\text{minimize } f(x) \tag{1}$$

$$\text{subject to } G(x) \leq G_0 \tag{2}$$

$$x_{LB} \leq x \leq x_{UB} \tag{3}$$

여기서 $f(x)$ 는 목적함수, $x = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_n]$ 은 제어변수들(예를들어 연삭에서의 infeed율)의 벡터를 나타낸다. $G(x)=[g_1(x), \dots, g_i(x), \dots, g_n(x)]$ 는 구속변수들의 벡터를 구성하며, $G^0 = [g_1^0, \dots, g_i^0, \dots, g_n^0]$ 은 그들의 한계를 나타낸다. x_{LB} 와 x_{UB} 는 제어변수의 상한값과 하한값을 나타낸다.

전통적인 최적화 방법에서 $g_i(x)$ 는 제어변수 x 의 향으로 정확하게 구속변수를 정의 한다고 가정하나, 통계적인 최적화 방법에서는 각 $g_i(x)$ 는 다음과 같이 두 성분으로 구성된다고 가정한다.^[15]

$$g_i(x) = g_{di}(x) g_{ni} \tag{4}$$

여기서 $g_{di}(x)$ 는 구속변수의 결정적인 특성을 나타내며 g_{ni} 는 불규칙성을 내포하고 있다. 비록 식(4)는 구속변수들의 불규칙한 변화를 나타내지만 모델링의 부정확성을 나타내지는 않는다. g_{di} 와 g_{ni} 에서의 부정확성에 의하여 야기되는 바이어스를 설명하기 위하여 모델은 잡음에 의하여 나타나는 것 보다 큰 분산을 포함하여야 한다. 이것은 구속조건과 준최적해(sub-optimal solution)에 불필요한 처짐을 야기시킨다. 이 방법에서는 $g_{di}(x)$ 의 불확실 파라미터(계수와 지수들)에 대한 가능한 값의 범위를 고려함으로써 설명할 수 있다. 각각의 불확실 파라미터 k_i 에 대하여 이 범위들이 다음과 같이 정의된다.

$$k_i' (1-b_i) \leq k_i \leq k_i' (1+b_i) \tag{5}$$

여기서 k_i' 는 그들의 공칭값과 바이어스 인자 b_i 를 나타낸다.

RCB법은 Fig. 1에 나타난 것처럼 비선형프로그램, 모델과 공정사이의 관계를 감독하는 것이다. 첫째 사이클에서는 최악의 경우 모델을 구성한다. 가능성을 확보

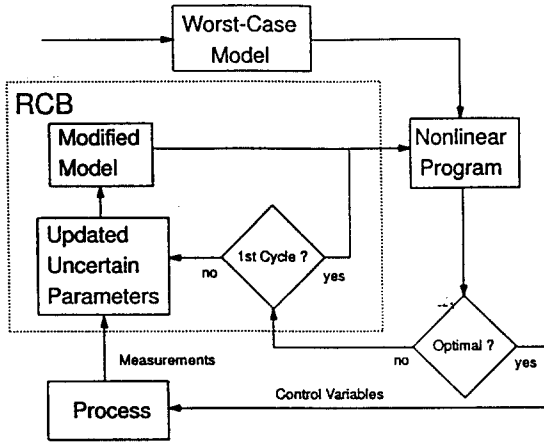


Fig. 1 Supervisory role of RCB

하기 위하여 최악의 경우 모델에 대하여 모노토니시티 (monotonicity) 해석을 통하여 불확실 파라미터 k_i 의 극한값이 선택된다. 이 해석을 위하여 모노토니시티 벡터 $M = [m_i]$ 가 만들어지며 여기서 각 성분 m_i 는 불확실성 파라미터 k_i 에 따른다. 이 벡터들은 k_i 와 대응되는 구속변수 사이의 모노토니시티를 다음과 같이 나타낸다.

$$m_i = \begin{cases} 1 & \text{positive monotonicity} \\ 0 & \text{no relation} \\ -1 & \text{negative monotonicity} \end{cases} \quad (6)$$

이것으로부터 불확실성 파라미터의 극한값은 다음과 같이 계산된다.

$$k_i = k_i' (1 + m_i b_i) \quad (7)$$

그러므로 최악의 경우 모델은 구속변수의 상계값을 나타낸다. 공정의 첫째 사이클의 제어변수는 이 모델의 최적점으로서 비선형프로그램에 의하여 얻어진다. 이 제어변수들은 잡음성분 g_{ni} 의 확률분포나 바이어스인자 b_i 의 재래적인 선택에 기인하여 준최적값이 된다. 그러나 최악의 경우 모델에 기초하여서는 공정의 더 이상의

개선은 불가능하다.

목적함수 $f(x)$ 를 더 이상 감소시키기 위하여 RCB법은 공정모델에서 불확실 구속관계 g_{di} 를 다시 정의한다. 이를 위하여 방금 완료된 사이클에 대하여 구속변수 $g_{mi}(j-1)$ 의 측정값을 얻는다. 각 불확실 구속변수에 대하여 다음과 같은 등식이 정의된다.

$$g_{di}(x(j-1))g_{ni}(j-1) = g_{mi}(j-1) \quad (8)$$

여기서 g_{di} 는 방금 완료된 사이클에 대한 모델된 구속변수를 나타내며 $g_{mi}(j-1)$ 은 실제 측정값을 나타낸다. 이 관계는 다음 사이클의 구속관계를 나누어 줌으로써 재 정의 된다.

$$g_{di}(x(j))g_{ni}(j) \leq g_i^0 \quad (9)$$

이 식은 다음과 같이 나타내지며,

$$g_{mi}(j-1) \left[\frac{g_{mi}(j)}{g_{mi}(j-1)} \right] \left[\frac{g_{di}(x(j))}{g_{di}(x(j-1))} \right] \leq g_i^0 \quad (10)$$

이 관계를 다시 정리하면,

$$g_{di}(x(j)) \leq g_i^0 \left[\frac{g_{di}(x(j-1))}{g_{mi}(j-1)} \right] \left[\frac{g_{mi}(j-1)}{g_{mi}(j)} \right] \quad (11)$$

식(11)에서의 g_{di} 는 식(6)에 의하여 정의된 불확실 파라미터 k_i 를 포함하며 제어변수의 향으로 구속변수를 나타낸다. 다음 사이클에 대한 구속변수의 제한은 모델에서 얻어진 값뿐 아니라 방금 완료된 사이클로부터 측정된 변수값의 향으로 정의된다. 이 새로운 표현의 이점은 만일 구속변수가 그 한계값 이하에 있다는 것을 측정값이 가리킬 때 이 값을 증가시킬 수 있다는 것이다. RCB법의 중요한 역할은 수정된 구속관계에 대하여 불확실성 파라미터의 극한값을 선택함으로써 구속 만족를 확보할 수 있다는 점이다. 이 극한 파라미터들은 제어변수에서 주어진 변화로 선택되기 때문에 구속변수의 수정된 구속관계에 대한 예측은 극한값이다.

이 수정된 구속관계는 첫 사이클 후의 제어변수를 결정하기 위한 비선형 프로그램에서 사용된다. 한 구속변수에 대한 RCB법의 효과는 Fig. 2에 나타내었다. 이 그림에서의 상계는 g_i^0 에서 최저의 잡음조건 아래서 구

속변수의 경계를 나타내 주며 반면에 g_i 에서의 점선은 가장 유리한 잡음조건 아래에서의 경계를 나타낸다. 이 두 선들 사이의 영역은 구속변수의 증가가 안전하게 이루어 질 수 없는 영역을 구성한다. 구속변수의 측정값이 이 영역 안으로 들어올 때 잡음으로 기인하여 구속이 엄밀한지 아닌지를 결정할 수 없다. 그러나 측정값이 이 영역 안에 있지 않으면 제어변수의 같은 집합의 반복된 사용은 측정값이 이 영역밖에 떨어지는 결과를 초래하여 구속변수가 증가되게 한다. Fig. 2는 이 방법에 의하여 이 공정이 연속적으로 개선됨으로써 구속변수가 그 극한에 도달한다는 것을 보여준다.

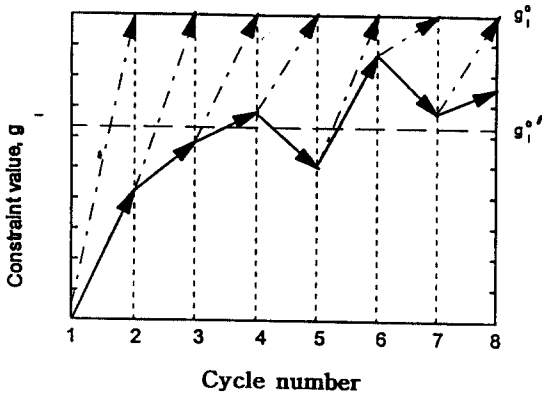


Fig. 2 The effect of cycle time reduction by RCB on a typical constraint

3. 연삭 사이클

내면 원통 플랜지 연삭작업에서는 재료의 원통형 밴드가 베어링 또는 원통형 공작물 안쪽에서부터 제거된다. 공작물과 숫돌이 회전하는 동안 공작물 보다 직경이 작은 숫돌이 공작물 쪽으로 전진한다. 이 연구의 목적은 부품의 품질과 구속조건을 만족하면서 연삭사이클 시간을 최소화하는 것이다. 전형적인 연삭작업에 대한 제어 infeed사이클은 프로그램된 infeed속도 $u(t)$ 에 의하여 Fig. 3과 같이 세 단계로 나눈다 :

- (1) 빠른 infeed속도 u_1 에 의한 황삭단계
- (2) 느린 infeed속도 u_2 에 의한 정삭단계

(3) infeed가 영인 스파크아웃(spark-out)단계

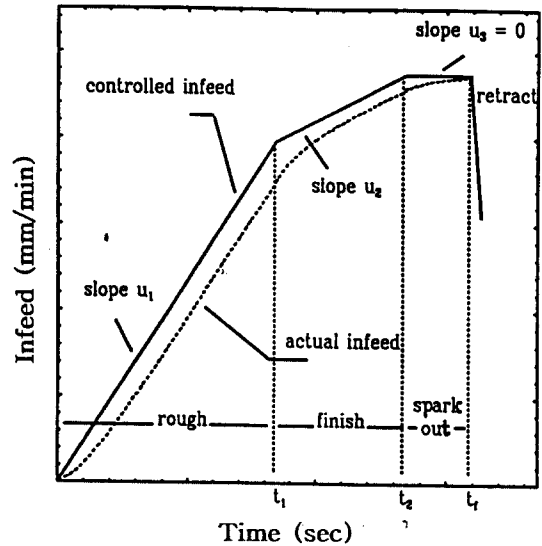


Fig. 3 Illustration of a grinding cycle consisting of roughing, finishing and spark-out stages

이 사이클은 숫돌이 공작물로부터 급속하게 빠져나오면서 끝난다. 연삭 사이클의 사양은 연속된 세 단계의 각각의 시간과 infeed율 u_1 과 u_2 의 값을 요구한다. 덧붙여 말하면 그것은 숫돌을 재연삭할 지를 결정하는 것이며 만일 재연삭한다면 드레싱리드(s_d)가 주어져야한다.

제어되는 infeed에 대응하여 공작물의 반경방향 크기 감소는 Fig. 3처럼 실제 infeed곡선을 따른다. 각 단계의 시작에서 실제 infeed의 과도상태는 주로 시스템의 탄성적인 처짐과 연삭숫돌의 반경방향의 마멸에 기인한다. 이 과도 거동은 시정수 τ 에 의하여 특성지워지는 1계 시스템에 의하여 근사화된다.^[11]

이 연삭작업의 최적화문제는 제어변수 $u_1, u_2, t_1, t_2, t_3, s_d$ 에 관하여 다음 구속조건을 만족시키면서 사이클 시간을 최소화하는 것이다. 즉

$$\text{사이클시간} : T = t_1 + t_2 + t_3 \quad (12)$$

$$g_1 = u_1 t_1 + u_2 t_2 - \Delta r = 0 \quad (\text{크기구속조건}) \quad (13)$$

$$g_2 = z_1 - q_2 \leq 0 \quad (\text{열적손상 구속조건}) \quad (14)$$

$$g_3 = R_a \leq R_{\max} \quad (\text{표면거칠기 구속조건}) \quad (15)$$

$$g_4 = r \leq r_{\max} \quad (\text{진원도 구속조건}) \quad (16)$$

위의 모델에서 등호 g_1 은 크기 요구 조건을 정의하며 여기서 Δr 은 공작물의 반경방향의 여유를 나타낸다. 부등호 g_2 는 열적손상 구속조건에 대한 공작물 열적손상의 깊이를 나타낸다. 여기서 z_1 은 황삭단계중에 생성된 열적손상의 깊이를 나타내며 g_2 는 차후의 정삭단계에서 제거되는 깊이를 나타낸다. 부등호 g_3 는 표면거칠기 요구조건을 정의하며 여기서 R_a 는 실제 표면거칠기를 나타내며, R_{\max} 는 그 최대허용값을 나타낸다. 부등호 g_4 는 진원도 요구조건을 나타내며 여기서 r 은 진원도값이며, r_{\max} 는 최대허용 진원도를 나타낸다.

4. 시뮬레이션

내면 플런지 연삭에 대한 RCB법의 적용가능성을 시뮬레이션에 의하여 조사하였다. 실제로 이 방법은 사이클시간을 감소시키기 위하여 각 사이클의 끝에서 구속변수를 측정하였다. 이 연구를 위하여 측정값들은 원통플런지연삭의 시뮬레이션 프로그램을 사용하여 제공된다.⁽³⁾ 연삭모델의 대부분의 계수와 지수들은 사용된 특수한 조건에 대하여 경험적으로 결정되었다. 따라서 모델은 다른 조건에 대하여는 편차가 있다. 비록 여러 작업 조건에서 모델을 평가한다 하더라도 불확실성을 가진 대부분의 파라미터들은 k_1, k_2, k_3 로 결정된다. 이 불확정 파라미터를 통하여 소개된 모델링 바이어스는 $k_i(1-b_i)$ 에서부터 $k_i(1+b_i)$ 까지 변화하는 불확정 파라미터 k_i 의 임의의 값을 선정함으로써 시뮬레이션이 수행된다. [식 (6) 참조]

Table 1 Uncertainty specifications

Uncertain Parameters	Nominal Values	Bias Factors
k_1	k'_1 0.34	b_1 0.05
k_2	k'_2 -0.1345	b_2 0.05
k_3	k'_3 8.41	b_3 0.1

공칭값 k_i 와 k_1 과 k_2 의 불확정경계 b_i 와 k_3 를 Table 1에 나타내었다. 모델에서의 구속방정식은 절삭압음에 의하여 또한 영향을 받는다. 압음은 구속관계 g_2, g_3, g_4 에서의 g_{ni} 에 대하여 $(1-n_i)$ 와 $(1+n_i)$ 의 한계 안에서 균일한 확률분포를 한다고 가정한다. 시뮬레이션된 g_{ni} 값은 $(1-n_i)$ 와 $(1+n_i)$ 영역 사이에서 불규칙하게 선택된다. 이 연구에서는 모든 n_i 가 0.25로 정해지며 이 방법은 Fig. 4 처럼 시험된다. 첫째 사이클은 최악의 경

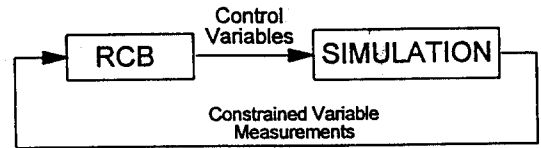


Fig. 4 Application of RCB in simulation

우 모델로부터 얻어진 최적 제어 변수로부터 시작되었다. 구속변수들의 값은 시뮬레이션블럭 으로부터 얻어지고 RCB로 보내진다. 이들 값에 기초하여 RCB는 사이클 시간의 감소를 목적으로 다음 사이클을 위하여 제어변수를 결정한다. 본 연구에서는 두 경우를 제시하는데 하나는 숫돌이 매 사이클 마다 재연삭되는 것이고 다른 하나는 그렇지 않은 경우이다.

각 사이클 이전에 숫돌이 재연삭되는 경우가 첫 번째로 고려되었다. 시작 사이클에서 최악의 경우 모델이 모노토니시티해석을 통하여 결정된다. 불확정 파라미터 k_1, k_2, k_3 에 관한 표면거칠기와 진원도 구속조건의 모노토니시티해석에 기초하여 모노토니시티벡터 $[m_1, m_2, m_3] = [-1, -1, +1]$ 이 얻어진다.

따라서 최악의 경우 모델의 파라미터는 다음과 같이 얻어진다 :

$$\begin{aligned} k_1 &= (1+m_1 b_1) k'_1 = 0.95(0.34) = 0.323 \\ k_2 &= (1+m_2 b_2) k'_2 = 0.95(-0.1345) = -0.1278 \\ k_3 &= (1+m_3 b_3) k'_3 = 1.1(8.41) = 9.251 \quad (16) \end{aligned}$$

그리고 전역적으로 수렴하는 특성을 가지며 탐색방향 (search direction)을 찾기위하여 순환 2차방정식 프로그램방법을 이용하는 비선형 프로그램 RQP(Recursive Quadratic Programming)로부터 얻어지는 제어변수

들은 다음과 같다.⁽¹³⁾

$$[t_1, t_2, t_3, u_1, u_2, s_d] = [9.20, 7.11, 5.55, 2.48, 3.1, 38] \quad (17)$$

이 최적점에서 네 구속변수 (g_1, g_2, g_3, g_4)의 모델에서 얻어진 값들은 그들의 한계 $[0, 0, 0.7, 0.6]$ 안에 있다는 것이 주목된다. 그러나 시뮬레이션은 위의 제어변수를 가지고 수행되었고 구속변수들은 다음과 같이 얻어진다.

$$[g_{m1}, g_{m2}, g_{m3}, g_{m4}] = [0.0, -0.0011, 0.42, 0.5469] \quad (18)$$

이미 예측한 바와 같이 이것들은 한계값 이하로 얻어졌다. 따라서 사이클 시간은 더 감소될 수 있을 것이다. 초기 사이클을 지나서 개선된 사이클 시간을 얻기 위하여 미지의 파라미터를 포함하는 구속방정식은 시뮬레이션으로부터 얻어진 구속변수에 기초하여 수정된다.

$$s_d(j)^{0.5} v_f(j)^{k_1} (1 + e^{k_2 t_3(j)}) \leq g_3^0 \left[\frac{s_d(j-1)^{0.5} v_f(j-1)^{k_1} (1 + e^{k_2 t_3(j-1)})}{g_{m3}(j-1)} \right] \left[\frac{1-n_2}{1+n_2} \right] \quad (19)$$

$$v_3(j) \leq g_4^0 \left[\frac{v_3(j-1)}{g_{m4}(j-1)} \right] \left[\frac{1-n_3}{1+n_3} \right] \quad (20)$$

여기서 $(1-n_i)/(1+n_i)$ 항들은 균일한 확률분포에 기초하여 $[g_{ni}(j-1)/g_{ni}(j)]$ 를 나타낸다. 예를들어 식 (20)에서 미지변수는 $v_3(j)$ 이며 이에반하여 $v_3(j-1)$ 은 방금 완료된 사이클로 부터의 변수이다. 수정된 식에 기초한 방정식은 RQP로부터 얻어진 두 번째 사이클에 대한 제어변수를 다음과 같이 제공한다.

$$[t_1, t_2, t_3, u_1, u_2, s_d] = [7.60, 3.96, 3.70, 29.4, 6.8, 72] \quad (21)$$

RCB법에 의하여 구속방정식을 수정하는 과정은 더 이상의 개선이 얻어지지 않을 때까지 각 사이클에 대하여 반복된다. Fig. 5에 이 경우에 대하여 10사이클에

대한 사이클 시간을 나타내었으며 Table 2에 제어변수를 나타내었다. Table 3에 사이클 시간과 구속변수들의 시뮬레이션 결과를 나타내었다.

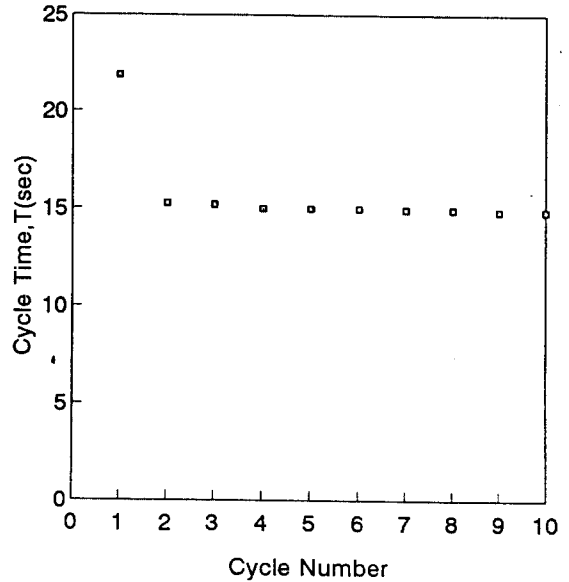


Fig. 5 Cycle time improvement by RCB where the wheel was redressed at every cycle

Table 2 Control variables for the case where the wheel was redressed for every cycle

Iteration Number	Cycle Times(sec)			Infeed Rates($\mu\text{m/s}$)		Dressing Lead, $s_d(\mu\text{m})$
	t_1	t_2	t_3	u_1	u_2	
1	9.20	7.11	5.55	24.8	3.1	38.7
2	7.60	3.96	3.70	29.4	6.8	72.1
3	7.60	3.90	3.70	29.3	7.0	71.8
4	7.25	4.04	3.70	30.0	8.0	75.9
5	7.26	4.03	3.70	30.0	8.0	75.9
6	7.26	4.03	3.70	30.0	8.0	75.9
7	7.26	3.98	3.70	30.0	8.1	76.6
8	7.26	3.98	3.70	30.0	8.1	76.6
9	7.26	3.90	3.70	30.0	8.3	78.0
10	7.26	3.90	3.70	30.0	8.3	78.0

Table 3 Constrained variables and cycle times for the case where wheel was redressed for every cycle

Iteration Number	Constraints, g_i				Cycle Time, T(sec)
	g_1	g_2	g_3	g_4	
1	0.0	-0.0011	0.420	0.5469	27.86
2	0.0	-0.0004	0.648	0.4082	21.26
3	0.0	-0.0005	0.643	0.4333	21.20
4	0.0	-0.0081	0.667	0.5617	20.99
5	0.0	-0.0118	0.671	0.5882	20.98
6	0.0	-0.0096	0.663	0.5785	20.98
7	0.0	-0.0065	0.687	0.5738	20.94
8	0.0	-0.0068	0.660	0.5675	20.94
9	0.0	-0.0114	0.686	0.5888	20.86
10	0.0	-0.0110	0.677	0.5739	20.86

재연삭된 슷들은 누적된 연삭길이 L_s 와 인덱스 n_i 의 값을 변경하여야 한다. ⁽⁷⁾

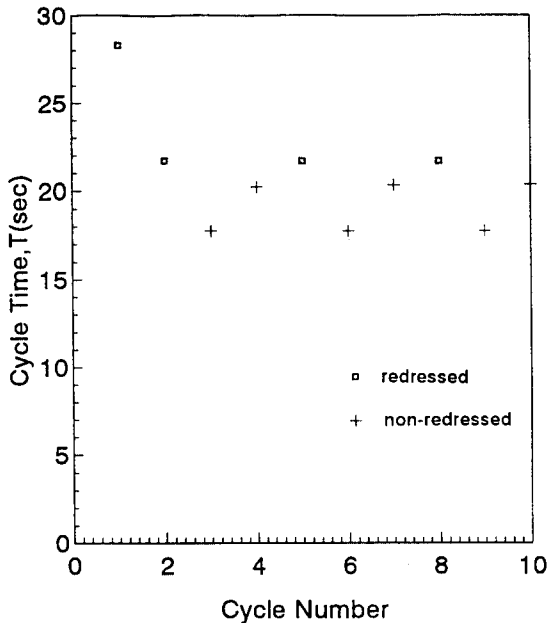


Fig. 6 Cycle time improvement by RCB where the wheel was not redressed at every cycle.

일반적으로 슷들이 재연삭되면 재연삭 시간의 비용이 드나, 짧은 사이클 시간을 얻을 수 있다. 슷들에 재연삭이 필요한지 아닌지를 결정하기 위하여 재연삭된 슷들과 마모된 슷들에 대한 사이클 시간이 RQP로부터 얻어졌다. 사이클 시간이 비교되기 전에 재연삭되는 경우에 대하여 슷들 재연삭 시간(이 경우 5초)이 더해져야한다. 예를들어 두 번째 사이클에 대한 사이클 시간은 재연삭과 재연삭하지 않은 경우에 16.73초와 21.26초가 각각 얻어졌으며 재연삭시간은 포함되지 않았다. 재연삭시간을 포함한 후에 사이클 시간은 21.73초와 21.26초가 얻어졌으며 RCB법은 두 번째 사이클에 대하여 재연삭을 선택하지 않는다. 이 경우 10사이클에 대한 사이클 시간은 Fig. 6에 그리고 제어변수는 Table 4에 나타내었다. 또한 구속변수는 Table 5에 나타내었다.

Table 4 Control variables for the case where the wheel was not redressed for every cycle

Iteration Number	Cycle Times(sec)			Infeed Rates(μ m/s)	
	t_1	t_2	t_3	u_1	u_2
1	9.20	6.98	6.12	24.7	3.3
2	6.88	4.97	3.88	30.0	8.8
3	6.86	7.04	3.88	30.0	6.3
4	9.44	5.85	4.98	24.1	3.8
5	6.88	4.97	3.87	30.0	8.8
6	6.86	7.04	3.87	30.0	6.3
7	9.50	5.71	5.16	24.1	3.6
8	6.89	4.96	3.87	30.0	8.8
9	6.86	7.04	3.87	30.0	6.3
10	9.51	5.68	5.20	24.1	3.6

Table 5 Constraints and total cycle times for the case where the wheel was not redressed for every cycle

Iteration Number	Constraints, g_i				Cycle Time, T(sec)
	g_1	g_2	g_3	g_4	
1	0.0	-0.0046	0.399	0.3972	28.30
2	0.0	-0.0190	0.681	0.5583	21.73
3	0.0	-0.0146	0.659	0.5789	17.78
4	0.0	-0.0008	0.658	0.5696	20.26
5	0.0	-0.0197	0.678	0.5612	21.72
6	0.0	-0.0129	0.665	0.5717	17.77
7	0.0	-0.0028	0.651	0.6891	20.37
8	0.0	-0.0232	0.673	0.6891	21.72
9	0.0	-0.0126	0.691	0.6761	17.77
10	0.0	-0.0043	0.681	0.6940	20.40

5. 실험적 평가

RCB 법은 Fig. 7(a)와 (b)에 나타난 실제 연삭시스템에서 수행되었다. 연삭시스템은 스테핑 모터 infeed 구동기와 컴퓨터로 제어되며 전기적으로 공작물이 구동 되는 내면연삭기(Bryant 1116)에 동력모니터(A.F.Green TT2), 직경크기게이지(Marposs Micromar 5와 E9 Amplifier), 데이터 획득과 제어를 위한 PC로 구성된다. 동력 모니터로부터의 출력은 유효

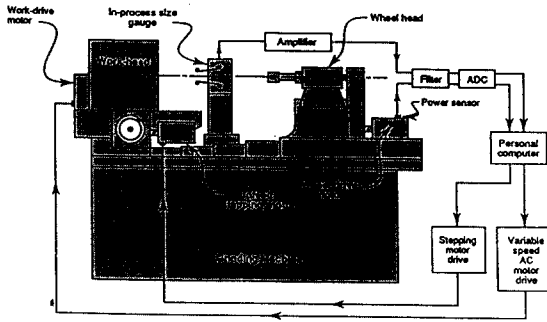


Fig. 7 (a) Experimental setup

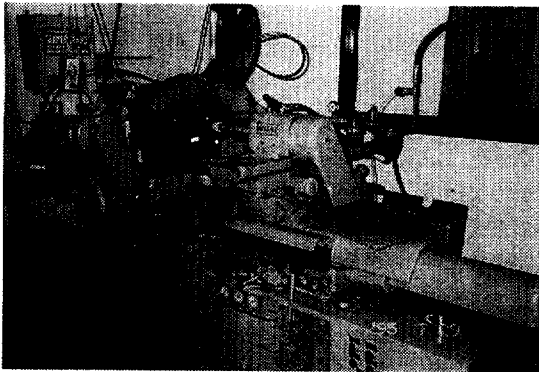


Fig. 7 (b) Internal grinding machine equipped with control and measuring system

숫돌마멸(effective wheel dullness) A_{eff} 를 예측하는데 이용하는데 이것은 열적 손상이 발생되었는지 여부를 지시해 준다. 열적 손상이 있다면 A_{eff} 는 공작물의 손상된 층 z_1 의 깊이를 예측하게 해 준다. 크기게이지로부터

터의 출력은 제거될 반경방향의 남아 있는 깊이를 지시해 주며 시스템의 탄성 처짐과 숫돌의 반경방향의 마멸(연삭비 G)을 예측하는데 이용된다. 두 개의 in-process센서로부터 얻어지는 정보는 공작물의 품질(예를들어 표면거칠기와 진원도)의 post-process 측정과 함께 구속조건을 평가하는데 사용된다. 이 실험들은 시뮬레이션에 사용되는 동일한 잡음과 바이어스 레벨로 수행되나 추가적인 파라미터 (n_0)가 바이어스 된다고 고려하면 n_0 는 k_1 를 대체하게 된다. 바이어스레벨 b_1 는 0.1로 정해졌다. n_0 파라미터는 숫돌이 사이클 사이에서 재연삭되지 않을 때 표면 진원도가 나빠지는 율에 대한 특성을 나타낸다. 바이어스항은 실험에 사용된 숫돌(32A80L6)과 모델에 적용한 숫돌(32A80M6)이 다르기 때문에 포함된다.

두 종류의 실험중 하나는 허용되는 평균거칠기가 $0.7 \mu m$ 이었고 다른 하나는 $0.9 \mu m$ 이었다. 두 경우 RCB 법은 숫돌이 재연삭이 필요한지 여부를 결정한다. 숫돌 재연삭은 측정된 연삭길이 L_s 와 인덱스 n_1 의 값을 변화시킨다.^[7] 일반적으로 숫돌이 재연삭되면 재연삭시간을 소비하지만 더 짧은 사이클 시간을 성취할 수 있다. 숫돌이 재연삭이 필요한지 여부를 결정하기 위하여 재연삭된 숫돌과 마모된 숫돌에 대한 사이클 시간이 RQP로부터 얻어진다. 숫돌 재연삭에 대한 시간은 사이클 시간을 비교하기 이전에 재연삭 경우에 대한 사이클 시간에 더해져야한다.

각 운전에 대한 첫째 사이클은 최악의 경우 모델로부터 최적 제어변수를 얻음으로써 시작된다. 구속변수의 값들은 공정의 측정값들로부터 얻어지며 RCB에 주어진다. 이 값들에 기초하여 RCB는 사이클 시간을 감소시키기 위하여 다음 사이클에 대한 제어변수를 결정한다.

첫 번째 실험은 $0.7 \mu m$ 표면거칠기 요구조건에 대하여 수행되었다. 첫째 사이클에 대하여 RCB는 최악의 경우 모델을 구성한다. 표면거칠기의 RCB 모노토니시티 해석과 불확정 모델 파라미터 k_1, k_2, k_3, k_4 그리고 모노토니시티 벡터 $[m_1, m_2, m_3, m_4] = [-1, -1, +1, -1]$ 가 얻어졌다. 따라서 최악의 경우 모델의 파라미터가 다음과 같이 얻어진다 :

$$k_1 = (1 + m_1 b_1) k_1 = 0.95(0.34) = 0.323$$

$$k_1 = (1 + m_2 b_2) k_2 = 0.95(-0.1345) = -0.1278 \quad (22)$$

$$k_3 = (1 + m_3 b_3) k_3 = 1.1(8.41) = 9.251$$

$$k_4 = (1 + m_4 b_4) k_4 = 0.9(5.59) = 5.031$$

RQP로부터 얻어진 제어변수는 다음과 같다.

$$[t_1, t_2, t_3, u_1, u_2, s_d] = [11.84, 7.76, 6.24, 18, 4, 40] \quad (23)$$

이 최적점에서 네 구속변수 $[g_1, g_2, g_3, g_4]$ 의 모델에서의 값은 그들의 경계 $[0, 0, 0.7, 0.6]$ 내에 있다. 그러나 실험이 위의 제어변수로 수행될 때 구속변수들의 측정값은 다음과 같다.

$$[g_{m1}, g_{m2}, g_{m3}, g_{m4}] = [0.0, -0.0015, 0.41, 0.40] \quad (24)$$

예측한대로 구속변수들은 그들의 경계아래에 있으며 사이클 시간은 더욱 감소될 수 있었다. 사이클 시간을 개선하기 위하여 미지 변수를 포함하고 있는 구속방정식은 측정된 구속변수에 기초하여 수정된다. 이 수정된 식을 기본으로 RCB는 슷들의 재연삭 여부를 조사한다. 두 번째 사이클에 대하여 RCB는 재연삭 슷들을 선택한다. RQP로부터 얻어지는 두 번째 사이클에 대한 제어변수는 다음과 같다.

$$[t_1, t_2, t_3, u_1, u_2, s_d] = [11.30, 3.70, 3.70, 21, 4, 86] \quad (25)$$

실험이 이 제어변수로 수행되고, 구속변수 측정값이 다음과 같이 얻어진다.

$$[g_{m1}, g_{m2}, g_{m3}, g_{m4}] = [0.0, -0.0030, 0.64, 0.55] \quad (26)$$

구속조건은 그들의 제한 내에 있었으며 사이클 시간은 더 감소될 수 있었다. 세 번째 사이클에 대하여 RCB는 슷들의 재연삭을 선택하지 않았다. RQP를 통해서 얻어진 제어변수는 다음과 같다.

$$[t_1, t_2, t_3, u_1, u_2] = [12.80, 5.46, 4.72, 18.4] \quad (27)$$

실험은 이 제어변수로 운전되며, 구속변수 측정값은 다음과 같이 얻어진다.

$$[g_{m1}, g_{m2}, g_{m3}, g_{m4}] = [0.0, -0.0020, 0.81, 0.58] \quad (28)$$

이 사이클에서 표면거칠기 구속조건을 침범하였으므로 이 위반의 원인이 결정될 때까지 실험이 정지된다. 재연삭되지 않을 때 표면거칠기에 관한 해석은 바이어스 인자 b_4 가 너무 작았음을 보여 주었다. 시뮬레이션은 증가된 바이어스인자 b_4 를 가지고 수행되며 증가된 범위 안에서 RCB는 항상 재연삭을 선택하였다. 앞에서의 실험 결과로부터 RCB는 다음 사이클에 재연삭을 추천하였고, RQP로부터 얻은 제어변수들은 다음과 같다.

$$[t_1, t_2, t_3, u_1, u_2, s_d] = [9.68, 3.70, 3.70, 24, 4, 105] \quad (29)$$

실험은 이 제어변수들로 수행되었으며, 구속변수 측정값은 다음과 같이 얻어졌다.

$$[g_{m1}, g_{m2}, g_{m3}, g_{m4}] = [0.0, -0.0018, 0.69, 0.57] \quad (30)$$

구속변수들은 그들의 제한보다 약간 아래에 있었고 따라서 이 사이클은 최적이라고 간주되었다. 제어변수와 사이클 시간은 Table 6에 나타내었고 대응되는 구속변수들은 Table 7에 나타내었다. 이 경우 사이클 증가에 따라 사이클 시간이 31.84초에서 23.08초로 현저하게 감소되는 것이 관찰되었다. 슷들이 재연삭되었을 때의 문제를 더욱 추적하기 위하여 두 번째 실험이 증가된 최대 평균 표면거칠기 $0.9\mu\text{m}$ 로 수행되었다. 이 실험을 위한 제어변수들은 Table 8에 나타내었고 대응되는 구속변수들은 Table 9에 나타내었다. RCB는 첫째와 넷째 사이클에 대해서는 재연삭을 선택하였으나 셋째와 다섯째 사이클에 대해서는 재연삭을 선택하지 않았다. 표면거칠기 구속조건이 $0.9\mu\text{m}$ 로 증가된 경우에는 재연삭을 선택한 둘째와 넷째 사이클에서 약간의 사이클시간 감소를 보였으나 재연삭을 선택한 셋째와 다섯째 사이클에서는 표면거칠기 구속조건을 침범하지 않으면서 현저한 사이클시간의 감소를 보이는 것을 알수 있었다.

Table 6 Control variables for the case with maximum surface roughness of $0.7\mu\text{m}$

Iteration Number	Cycle Stage Times(sec)			Infeed Rates($\mu\text{m/s}$)		Dressing Lead, $s_d(\mu\text{m/s})$	Cycle Time, T(sec)
	t_1	t_2	t_3	u_1	u_2		
1	11.84	7.76	6.24	18	4	40	31.84
2	11.30	3.70	3.70	21	4	86	24.70
3	12.80	5.46	4.72	18	4	n.a.	22.98
4	9.68	3.70	3.70	24	4	105	23.08

Table 7 Constraints for the case with maximum surface roughness of $0.7\mu\text{m}$

Iteration Number	Constraints, g_i			
	g_1	g_2	g_3	g_4
1	0.0	-0.0015	0.41	0.40
2	0.0	-0.0030	0.64	0.55
3	0.0	-0.0020	0.81	0.58
4	0.0	-0.0018	0.69	0.57

Table 8 Control variables for the case with maximum surface roughness of $0.9\mu\text{m}$

Iteration Number	Cycle Stage Times(sec)			Infeed Rates($\mu\text{m/s}$)		Dressing Lead, $s_d(\mu\text{m/s})$	Cycle Time, T(sec)
	t_1	t_2	t_3	u_1	u_2		
1	11.60	5.88	4.23	19	4	66	27.71
2	9.64	3.70	3.70	24	4	108	23.04
3	9.77	4.96	3.70	23	4	n.a.	18.43
4	8.5	3.70	3.70	28	4	125	21.90
5	10.00	5.64	4.05	23	4	n.a.	19.69

Table 9 Constraints for the case with maximum surface roughness of $0.9\mu\text{m}$

Iteration Number	Constraints, g_i			
	g_1	g_2	g_3	g_4
1	0.0	-0.0052	0.60	0.45
2	0.0	-0.0026	0.72	0.53
3	0.0	-0.0017	0.85	0.48
4	0.0	-0.0031	0.79	0.57
5	0.0	-0.0014	0.89	0.52

6. 결론

이 연구에서는 공정의 경험적인 모델에 내재되어 있는 모델링 바이어스 뿐만 아니라 잡음에 대처하기 위하여 고안된 RCB(Recursive Constraint Bounding)법의 제조공정 최적화에의 적용 가능성에 대한 연구를 수행하였다.

RCB법은 불확실성 변수의 극한을 선택하기 위하여 모노토니시티 해석을 사용하였으며 그 최적성을 평가하기 위하여 각 사이클의 끝에서 구속변수의 측정값을 이용하였다.

이 방법은 내면 원통 플런지 연삭공정에 대하여 시물레이션으로 조사되었으며 실제 연삭공정에 대하여 실험적으로 평가되었다. 시물레이션 결과 이 방법은 모델링 바이어스와 잡음의 존재에도 불구하고 구속조건을 만족시키면서 사이클 시간을 개선할 수 있다는 것을 보여주었다. 또한, 이 결과와 비교 검토하기 위하여 $0.7\mu\text{m}$ 와 $0.9\mu\text{m}$ 의 표면거칠기 구속조건에 대하여 내면 연삭 실험을 수행하였다. 실험결과 $0.7\mu\text{m}$ 의 표면거칠기 구속조건인 경우 네 번째 사이클만에 7.76초 의 사이클시간 감소를 달성할 수 있었다.

$0.9\mu\text{m}$ 의 표면거칠기 구속조건인 경우 세 번째 사이클 만에 9.28초 의 사이클시간 감소를 달성하였다.

향후 보다 신뢰성있는 결과를 얻기 위해서는 다양한 조건에서의 실험이 수행되어야 할 것으로 사료된다.

후기 : 본 연구는 학술진흥재단의 교수국비해외파견 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. A. Bhattacharyya, R. Faria-Gonzalez and I.Ham, "Regression Analysis for Predicting Surface Finish and its Application in the Determination of Optimum Machining Conditions", Trans. ASME, Vol. 92, pp. 711-714, 1970.

2. M. L. Brown and D. E. Whitney, "Stochastic Dynamic Programming Applied to Planning of Robot Grinding Tasks : Part 1-Problem Formulation", Control of Manufacturing Processes, ASME, DSC-Vol. 28, pp. 115-123, 1991.
3. N. Chiu, "Computer Simulation for Cylindrical Plunge Grinding", M.S. thesis, Uni. Massachusetts, 1989.
4. G. Xiao, S. Malkin and K. Danai, "Intelligent Control of Cylindrical Plunge Grinding", Proc. of the 1992 American Controls Conference, Chicago, Illinois, pp. 391-398, 1992.
5. D. S. Ermer and S. Kromodihardjo, "Optimization of Multipass Turning With Constraint", ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 103 pp. 462-468, 1981.
6. D. G. Luenberger, "Linear and Nonlinear Programming, Addison-Wesley, 1989
7. S. Malkin, "Grinding Technology: Theory and Application of Machining with Abrasives, Chapter 10: Optimization, Adaptive Control, and Intelligent Grinding", John Wiley & Sons, 1989.
8. D. Y. Jang and A. Seireg, "Machining Parameter Optimization for Specified Surface Conditions", ASME J. of Eng. for Industry, Vol. 114, pp. 254-257, 1992.
9. Y. Koren, "Flank Wear Model of Cutting Tools Using Control Theory", ASME J. of Eng. for Industry, Vol. 100, No. 1, pp. 103-109, 1978.
10. Y. Koren and E. Lenz, "Mathematical Model for the Flank Wear While Turning Steel With Carbide Tools", CIRP Seminar, June, Trondheim, 1970.
11. S. Malkin, "Practical Grinding Optimization", Manufacturing Technology Review, SME Paper No. MR 86-637, pp.123-140, 1987
12. P.Y. Papalambros and D.J. Wilde, "Principles of Optimum Design", Cambridge University Press, Cambridge, Massachusetts, 1988.
13. M. J. D. Powell, "Algorithm for Nonlinear Constraints that Use Lagrangian Functions", Mathematical Programming, Vol. 14, pp. 224-248, 1978.
14. A. Rao and S. Malkin, "Process Monitoring for Intelligent Control of Grinding", 4th International Grinding Conference, pp. 511-512, 1990.
15. R. Ivester and K. Danai, "Cycle Time Reduction in Turning under Modeling Uncertainty", American Control Conference, pp. 1986-1990, 1993.